

Informe Científico-Técnico

“Dinámica de eventos tipo pulsantes en la radioemisión solar”

Proyecto:

“Análisis y caracterización de eventos solares tipo pulsantes con estructura temporal fina y del sistema dinámico Viento Solar-Magnetosfera-Ionosfera”

Programa:

“Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

Institución ejecutora:

Instituto de Geofísica y Astronomía

J' Proyecto: Lic. Adolfo L. Méndez Berhondo

Grado Científico: Doctor en Ciencias Geofísicas

Categoría Científica: Investigador Titular

Departamento de Astronomía, Instituto de Geofísica y Astronomía

Agencia de Medio Ambiente

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

La Habana, Cuba

- 2014 -

Índice

Resumen	10
Introducción	10
Materiales y Métodos	11
Resultados y Discusión	12
Conclusiones	14
Bibliografía	16
Figuras	17
Anexos	21

Resumen (236 palabras)

En este trabajo se continúan las investigaciones fundamentales astrofísicas dedicadas a la comprensión de los procesos y mecanismos de generación de la radio emisión solar asociada a explosiones solares (*flares*) y en particular la caracterización de algunos tipos de eventos de tipo pulsantes distinguidos por su estructura temporal fina (tiempos característicos menores de 1 s). El objetivo final de estas caracterizaciones es aplicar los resultados en modelos, métodos y procedimientos a la hora de diagnosticar la evolución de las fuentes de radio emisión solar asociadas a este tipo de fenomenología y en consecuencia, el pronóstico de la ocurrencia de estos eventos que pueden conducir al arribo de perturbaciones al medio circuniterrestre. Los eventos analizados, como casos de estudio, fueron eventos tipo *fibers* (*intermediate drifting patterns*, como también se le conoce en la literatura) y pulsaciones. Las observaciones fueron realizadas con el radio-polarímetro del Observatorio Astronómico de Trieste, Italia, en las frecuencias de 237, 327, 408 y 610 MHz con una resolución temporal de 10 ms. El estudio fue realizado a través de la dinámica que presentan las series temporales asociadas a estos eventos dentro del marco de la Teoría de Sistemas Dinámicos no Lineales (teoría del caos) mediante el cálculo de la dimensión de correlación, el exponente de Hurst y el factor de determinismo. Se determinó la dimensión del caos determinista en cada caso, revelando la complejidad en la evolución de la dinámica de tales sistemas.

Introducción

Las emisiones en ondas de radio en banda métrica y decimétrica asociadas a la ocurrencia de una explosión solar (*flare*), se caracterizan por su dinámica y complejidad. En particular, sobre el continuo de los eventos Tipo IV (usualmente, los más intensos y con mayor nivel de geoeffectividad) se suelen superponer eventos con una estructura temporal fina (tiempos característicos menor o del orden de 1 s) y superfina (tiempos característicos de decenas de ms). Estos eventos suelen presentarse en trenes donde se suceden unos a otros, llegando incluso a solaparse temporalmente, presentando una alta estructura temporal. Esto significa un proceso de fragmentación durante la emisión de la energía asociada a la evolución de estos eventos. Aún se desconoce cómo es este proceso de fragmentación, proponiéndose en general tres posibles escenarios (ej. Isliker 1992a):

- a) una fuente de emisión donde se están generando continuamente tales eventos y cuya evolución puede ser determinista o completamente estocástica,
- b) una fuente de emisión fragmentada en tantas fuentes como eventos (hasta 10^4). En tal caso no se conoce si todas están conectadas o son independientes, o si los eventos se suceden según una cadena de Markov,
- c) un escenario intermedio entre los dos anteriores: unas pocas fuentes de emisión generando repetitivamente.

Por otra parte, la gran diversidad de estos tipos de eventos con una estructura temporal fina (*fibers bursts*, *zebra patterns*, absorciones, pulsaciones, *spikes-like bursts*, Tipo I, etc.) supone número significativo de diferentes modelos teóricos y mecanismos de generación que expliquen la génesis y evolución de tales eventos.

Uno de los métodos para el estudio y comprensión de la naturaleza de tales eventos es verificar si la dinámica que subyace en su evolución puede ser descrita como un proceso regular (periódico o cuasi-periódico), estocástico o caótico determinista. Para ello se utilizan las herramientas de la Teoría de Sistemas Dinámicos no Lineales (teoría del caos) bajo la premisa fundamental postulada en el Teorema de Takens (Takens 1981) de que cualquier serie temporal que represente un fenómeno físico cualquiera (ej. nuestras secuencias de observaciones del flujo solar a una determinada frecuencia fija) es la realización de un proceso dinámico, conteniendo en sí misma información el proceso que la origina.

En este informe se resumen los principales resultados en el estudio de la dinámica en la evolución de un cluster de eventos tipo *fibers* y un grupo de pulsaciones observadas simultáneamente en un amplio rango de frecuencias métricas en la radioemisión solar. Estos eventos están asociados a la ocurrencia de grandes explosiones solares.

NOTA: Al final de este Informe Científico-Técnico se anexan cuatro artículos (dos publicados, uno aprobado para su publicación y uno enviado a publicar sujeto a proceso de arbitraje) en los cuales se pueden seguir en detalle todos los aspectos tratados en este Informe Científico-Técnico.

Materiales y Métodos

Se utilizaron observaciones de la radioemisión solar (en unidades de flujo solar¹) asociadas a explosiones solares correspondientes a los días 17 de abril de 2002 (cluster de *fibers*) y 17 de julio de 2002 (grupo de pulsaciones) en las frecuencias de 237, 327, 408 y 610 MHz. Las observaciones fueron realizadas con el radio-polarímetro de la Estación Basovizza del Observatorio Astronómico de Trieste, Italia (INAF-OAT). La resolución temporal utilizada fue de 10 ms (100 mediciones por segundo) y cubren un intervalo de 80 y 40 segundos respectivamente. La figura 1 muestra las series temporales correspondientes a las observaciones de la radioemisión solar asociadas a los eventos *fibers* (figura 1a) y a las pulsaciones correspondientes a la frecuencia de 237 MHz.

Siguiendo la metodología para el análisis de la dinámica de un sistema representado por una serie temporal, se construyó el espacio de fase (o espacio de los estados) para cada sistema dinámico (cluster de *fibers* y grupo de pulsaciones) reconstruyendo la serie de tiempo según el método de dimensiones embebidas, a través de un vector $\mathbf{x}(t)$ de ε dimensiones según (Takens 1981):

$$\mathbf{x}(t) = [x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (\varepsilon - 1)\tau)] \quad (1)$$

donde t representa el tiempo, ε es la dimensión embebida y τ es el tiempo de desplazamiento (*delay*). El Teorema de Takens asegura que el espacio de fase reconstruido de acuerdo con (1) conserva todas las propiedades de la serie temporal original. Para el cálculo del tiempo de desplazamiento τ , se utilizó el método de Información Mutua (*Average Mutual Information*, Fraser y Swinney 1986). La figuras 2 y 3 muestra los espacios de fase reconstruidos según (1) para el cluster de *fiber* y el grupo de pulsaciones respectivamente.

¹ Una unidad de flujo solar corresponde a $10^{-22} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ($= 10^4 \text{Jy}$)

La data seleccionada obedece los criterios fundamentales para su estudio dentro de la Teoría de Sistemas Dinámicos no Lineales (Isliker 1992b): la serie de tiempo es lo suficientemente larga y satisface el límite mínimo en el número de estructuras para la estimación de la dimensión fractal

$$N_s := N\Delta / \tau_{\text{autocorr}} \geq 100 \quad (2)$$

donde N_s es el número de estructuras (representa el número de órbitas en el espacio de fase), N es el largo de la serie de tiempo, Δ es la resolución temporal y τ_{autocorr} es el tiempo de autocorrelación (tiempo al cual la autocorrelación cae a $1/e$).

Resultados y Discusión

§1.- Cluster de eventos *fiber*

De la figura 2 se puede inferir la complejidad en la dinámica del sistema representado por el cluster de eventos *fiber*, así como la presencia de un atractor en el espacio de fase. En consecuencia se procedió a medir la extrañeza o dimensión del atractor. Para eso, se utilizó el cálculo de la dimensión de correlación (\mathbf{Dc}), la cual está relacionada con la correlación espacial entre los puntos del atractor y es una medida de cuán determinista es un proceso dinámico a través de la dimensión del caos. La dimensión de correlación \mathbf{Dc} fue calculada con el algoritmo de Grassberger-Procaccia (Grassberger y Procaccia 1983) a través de la integral de correlación $\mathbf{C}(\mathbf{r})$ la cual estima la probabilidad de que dos puntos cualesquiera del espacio de fase tomados al azar estén más cercanos que cierta distancia \mathbf{r} . Según este algoritmo, $\mathbf{C}(\mathbf{r}) \sim \mathbf{r}^{\mathbf{Dc}}$. Se calculó un valor para la dimensión de correlación del atractor en el espacio de fase de la serie temporal reconstruida del cluster de eventos *fiber*, $\mathbf{Dc} = 1.237 \pm 0.164$.

Otro parámetro calculado para caracterizar la dinámica del cluster de eventos *fiber* fue el exponente de Hurst. El exponente de Hurst, \mathbf{H} (Hurst 1951) es un parámetro adimensional introducido como una medida estadística de la auto-similaridad de un sistema dinámico. \mathbf{H} como medida de la geometría fractal de una serie de datos, \mathbf{H} mide la “suavidad” o “rugosidad” de una serie de tiempo. Tiene valores entre 0 y 1 (Mandelbrot and Wallis 1969): valores cercanos a 0 son típicos de series más “rugosas” e irregulares con alta dimensión fractal y caracteriza a procesos turbulentos y anti-persistentes en el tiempo.; valores cercanos a 1 son típicos de series temporales “suaves”, con baja dimensión fractal, caracterizando procesos persistentes en el tiempo. Para la serie de tiempo asociada a cluster de eventos *fiber* se encontró un valor para el exponente de Hurst, $\mathbf{H} = 0.827$, revelando un proceso determinista altamente persistente en el tiempo.

Buscando un significado físico a este valor encontrado de \mathbf{H} para la serie de tiempo asociada a cluster de eventos *fiber*, inspeccionamos el perfil característico de los eventos *fiber*. En la literatura son muy escasos los reportes y caracterización de este tipo de eventos observados a frecuencia fija a pesar de que los espectros dinámicos son insuficientes para describir con precisión algunos de los parámetros característicos de estos eventos (duración, intensidad, etc.). Aquí nos proponemos una caracterización a partir de un conjunto de casos de estudios seleccionados observados a frecuencia fija. Para ello es necesario un criterio de selección de eventos *fibers* que permita el análisis de cada evento individualmente. Esto constituye un elemento esencial para la comprensión de los procesos

que operan a estos niveles de la Región Activa y una herramienta fundamental para el diagnóstico del plasma coronal.

El perfil de las estructuras analizadas se caracteriza por la presencia de absorción abrupta seguida por un proceso de emisión impulsiva respecto al continuo de radio emisión, típico de este tipo de eventos, con un porcentaje de polarización (izquierda en este caso) cercano al 100 %. Fueron seleccionados un total de 58 de estos eventos. El criterio de selección fue que los niveles de absorción y emisión fuesen significativos respecto al continuo y no existiese solapamientos entre *fibers*.

De la inspección de la data resalta el hecho de que los *fiber* pueden ser separados en dos grupos dependiendo de las intensidades de cada proceso: un grupo donde la intensidad del proceso de absorción es mayor que la de la emisión, y otro donde la emisión es más intensa que la absorción. Esto indica que los perfiles de los eventos *fiber* no son simétricos, contrario a lo que sugiere Bernold y Treumann (1983). Para estimar esta posible relación cuantitativamente, se definió lo que llamamos parámetro del *fiber*, ϕ , como la razón entre las intensidades de ambos procesos. Se impuso la condición *a priori* que $\phi > 1$, esto es, dividir el análisis de ϕ según sean las intensidades de uno de los procesos mayor o menor que la del otro proceso. En la tabla I se muestran los valores de los cálculos por separado según sea un proceso más intenso que el otro.

Tabla I. Valores del parámetro del *fiber* ϕ con la condición *a priori* que $\phi > 1$.

	ϕ
Absorción más intensa que emisión (28 eventos seleccionados)	1.70 ± 0.78
Emisión más intensa que absorción (30 eventos seleccionados)	1.68 ± 0.52

Este resultado sugiere que el parámetro del *fiber*, ϕ , no muestra diferencia significativa según sea el proceso de absorción más intenso que el de emisión o viceversa, presentando un valor característico de $\phi \approx 1.7$. Del análisis de estos resultados se puede inferir que ambos procesos que caracterizan al *fiber* (absorción y emisión) están intrínsecamente relacionados fijados por un valor característico ($\phi \approx 1.7$ para el cluster de *fiber* bajo este estudio), lo que cualitativamente puede ser explicado como que el proceso de emisión depende del monto de energía remanente luego del proceso de absorción. Este resultado está en concordancia con los resultados en el cálculo del exponente de Hurst, **H**.

§2.- Grupo de pulsaciones

En este caso el análisis difiere en el sentido de que tenemos un grupo de pulsaciones observadas simultáneamente en un amplio rango de frecuencias métricas, lo que se traduce, en un rango significativo en altura de la corona solar (de 237 MHz a 610 MHz: de niveles más altos en la corona solar a niveles más bajos). En este caso, se analiza la evolución de un sistema dinámico no solo temporalmente, sino espacialmente también.

De la figura 3 se puede inferir la presencia de un atractor en el espacio de fase correspondiente a la serie temporal asociada a las pulsaciones observadas en 237 MHz. No obstante, a medida que

aumenta la frecuencia, la presencia del atractor se evidencia menos y el factor estocástico se hace más evidente. Por esa razón, se estimó primeramente cuán determinista es la serie de tiempo en cuestión a través del factor de determinismo λ . Para ello se aplicó el test de Kaplan-Glass (Kaplan y Glass 1992) a cada serie temporal reconstruida según (1). El test de Kaplan-Glass está relacionado con la magnitud de los vectores que definen las trayectorias en el espacio de fase reconstruido según (1) y tiene valores entre 0 y 1. Si $\lambda = 1$ significa que el sistema dinámico representado en el espacio de fase es totalmente determinista (ej, una función periódica). Un valor $\lambda = 0$ tipifica a los sistemas dinámicos estocásticos. Los valores hallados para cada serie de tiempo se muestran en la tabla II.

Para describir cuantitativamente la complejidad del sistema dinámico que representan las series temporales asociadas al grupo de pulsaciones observadas en 237, 327, 408 y 610 MHz, se calculó la dimensión para caracterizar el régimen del caos. Los valores se muestran en la tabla II.

Tabla II. Valores calculados para el factor de determinismo λ y la dimensión D_p para el grupo de pulsaciones analizadas.

Serie temporal	λ	D_p
Pulsaciones en 237 MHz	0.789 ± 0.120	3.625 ± 0.597
Pulsaciones en 327 MHz	0.687 ± 0.160	5.319 ± 0.937
Pulsaciones en 408 MHz	0.547 ± 0.190	5.580 ± 1.151
Pulsaciones en 610 MHz	0.497 ± 0.194	6.303 ± 1.075

Es notorio el aumento de la dimensión con la frecuencia en el sistema dinámico que representan las series temporales asociadas al grupo de pulsaciones observadas en 237, 327, 408 y 610 MHz. Esto indica un aumento de la complejidad del sistema a medida que nos adentramos en la corona solar dentro del rango entre 237 y 610 MHz. Estos valores revelan una transición continua desde un régimen caótico de baja dimensión (pulsaciones observadas en 237 MHz) a un caos de dimensión significativamente alta (pulsaciones observadas en 610 MHz). No se tiene conocimiento de reportes similares en la literatura. Cualitativamente, este resultado puede explicarse asumiendo una perturbación (fuente de las pulsaciones) generada en las capas altas (237 MHz) de la estructura magnética asociada que se propaga hacia los niveles más profundos (610 MHz) provocando una evolución no lineal en la dinámica de la interacción onda-partículas aumentando considerablemente los grados de libertad del sistema donde se verifica un proceso donde aumenta el grado de estocasticidad en el *input* del sistema con la altura en la estructura magnética asociada al sistema dinámico. En consecuencia, las pulsaciones no pueden ser explicadas en los marcos clásicos de oscilaciones magnetohidrodinámicas (ej. Roberts et al. 1984).

Farmer (1982) analizó la naturaleza de un sistema dinámico dominado por un de un atractor caótico y descrito por un sistema de ecuaciones diferenciales del tipo

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = F(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t - t_d)) \quad (3)$$

donde t_d es un tiempo de retardo (*delay*). Esta ecuación describe un sistema en el cual un estímulo tiene una respuesta retardada t_d . Al aumentar el retardo t_d se experimenta un aumento en la

dimensión del caos. Siguiendo esta idea, podemos explicar nuestros resultados cualitativamente asumiendo una perturbación (fuente de las pulsaciones) que se genera en niveles altos de la estructura magnética se propaga hacia niveles más bajos alcanzando estos niveles con un retardo que es cada vez mayor. En consecuencia, algunos parámetros fundamentales de la dinámica en la interacción onda-partícula evolucionan no linealmente aumentando la complejidad del sistema a medida que t_d aumenta o su equivalente, aumenta la frecuencia de la radioemisión o descendemos en altura.

La transición de un régimen caótico de baja dimensión a uno de alta dimensión (caracterizado por el aumento de D_p según aumenta la frecuencia) sigue una evolución “suave” cuasi-lineal (figura 4) lo cual está en conformidad con Farmer (1982).

Conclusiones

En este estudio se analizó la dinámica que subyace en la evolución de grupos de eventos solares del tipo pulsantes, cuya característica distintiva es que suelen presentarse en trenes donde se suceden unos a otros, llegando incluso a solaparse temporalmente, presentando una alta estructura temporal. Esto significa un proceso de fragmentación durante la emisión de la energía asociada a la evolución de estos eventos. El interés fundamental en este estudio es determinar si la dinámica de estos sistemas puede ser descrita como un proceso regular (periódico o cuasi-periódico), estocástico o caótico determinista. Para ello se utilizan las herramientas de la Teoría de Sistemas Dinámicos no Lineales. Los principales resultados en el estudio de la dinámica en la evolución de un cluster de eventos tipo *fibers* y un grupo de pulsaciones observadas simultáneamente en un amplio rango de frecuencias métricas en la radioemisión solar, se pueden resumir en:

Del estudio del sistema dinámico del cluster de eventos *fiber*, se concluye que:

- 1) La dinámica que subyace en la generación de este tipo de eventos está caracterizada por un proceso caótico de baja dimensión. Esto significa un proceso a-periódico sensible a variaciones de las condiciones iniciales. Este comportamiento caótico contrasta con un proceso oscilatorio cuasi-periódico de tipo *sausage* propuesto por Kuznetsov (2006) para explicar la generación de este tipo de evento.
- 2) No obstante, el valor encontrado para la dimensión de correlación ($D_c = 1.237 \pm 0.164$) indica un proceso caótico de baja dimensión con al menos un mínimo de 2 grados de libertad. Este valor es semejante a los valores que caracterizan a los atractores Henon y Rössler.
- 3) La dinámica está caracterizada por un proceso altamente persistente, tal y como lo indica el valor encontrado para el exponente de Hurst ($H = 0.827$). Esto estaría relacionado con el hecho de que el parámetro del *fiber*, ϕ , no muestra diferencia significativa según sea el proceso de absorción más intenso que el de emisión o viceversa, presentando un valor característico de $\phi = 1.7$. De esto se puede inferir que ambos procesos que caracterizan al *fiber* (absorción y emisión) están intrínsecamente relacionados fijados por un valor característico ($\phi = 1.7$ para el conjunto de *fibers* bajo este estudio), lo que cualitativamente puede ser explicado como que el proceso de emisión depende del monto de energía remanente luego del proceso de absorción.

- 4) Los perfiles de los eventos *fibers* no son simétricos, contrario a lo que sugiere Bernold y Treumann (1983).

Del estudio del sistema dinámico del grupo de pulsaciones observadas simultáneamente en un amplio rango de frecuencias métricas, se concluye que:

- 5) Se analiza la evolución de un sistema dinámico no solo temporalmente, sino espacialmente también.
- 6) El sistema dinámico no es totalmente determinista como lo indica el decrecimiento de factor λ con la frecuencia.
- 7) El análisis dimensional revela un cambio continuo en el régimen del caos: de un caos de baja dimensión en 237 MHz a uno de alta dimensión a 610 MHz. Los grados de libertad aumentan significativamente, lo que implica un aumento en la complejidad del sistema.
- 8) La transición de un caos determinista de baja dimensión a uno de una dimensión significativamente alta puede ser explicada en términos de un sistema en el cual un estímulo (la perturbación que genera las pulsaciones) tiene una respuesta de retardo. Al aumentar el retardo aumenta la dimensión del caos.

Bibliografía

- Bernold, T. E. X. y Treumann, R. A.: “The fiber fine structure during solar type IV radio bursts: observations and theory of radiation in presence of localized whistler turbulence”, *Astrophys. J.* **264**, 677-688 (1983).
- Farmer, J. D.: “Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamical system”, *Physica* **4D**, 366-393 (1982).
- Fraser, A. M. y Swinney, H. L.: “Independent coordinates for strange attractors from mutual information”, *Phys. Rev. A* **33**, 1134-1140 (1986).
- Grassberger, P. y Procaccia, I.: “Characterization of strange attractors”, *Phys. Rev. Lett.* **50**, 346-349 (1983).
- Hurst, H. E.: Long term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Eng.* 116: 770-799 (1951)
- Isliker, H.: “Structural properties of the dynamics in flare fragmentation”, *Sol. Phys.* **141**, 325-334 (1992a).
- Isliker, H.: “A scaling test for correlation dimensions”, *Phys. Lett. A* **169**, 313-322 (1992b).
- Kaplan, T. y Glass, L.: “Direct test for determinism in a time series”, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 427-430 (1992).
- Kuznetsov, A. A.: “Generation of intermediate drift bursts by magnetohydrodynamic waves in the solar corona”, *Sol. Phys.* **237**, 153-171 (2006).
- Mandelbrot, B. B., Wallis, J. R.: Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. *Water Resour. Res.* 5, 967-987 (1969).
- Robert, B., Edwin, P. M. y Benz, A. O.: “On coronal oscillations”, *Astrophys. J.* **279**, 857-865 (1984).
- Takens, F.: “Detecting strange attractors in turbulence”, *Lect. Notes Math.* **898**, 366-381 (1981).

Figuras

Figura 1. Series temporales correspondientes a las observaciones de la radioemisión solar asociadas a los eventos *fibers* (figura 1a) y a las pulsaciones correspondientes a la frecuencia de 237 MHz (figura 1b):

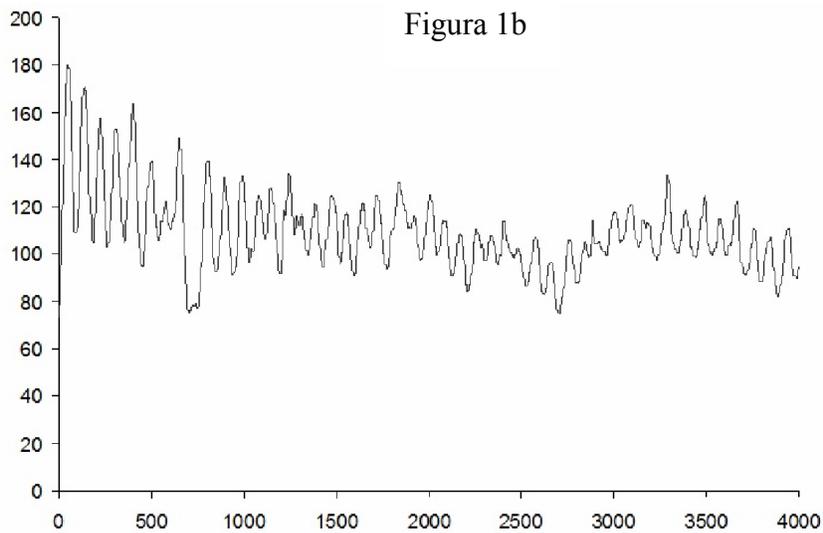
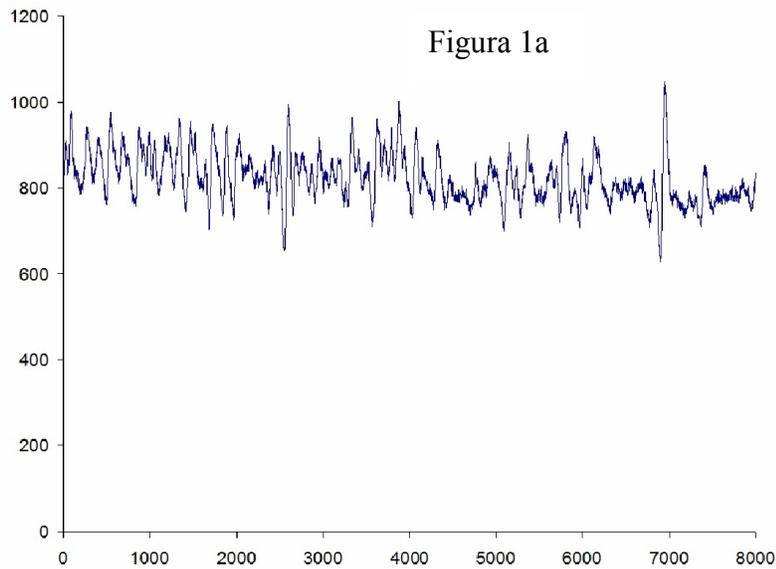


Figura 2. Espacio de fase reconstruido según (1) para el cluster de *fiber*:

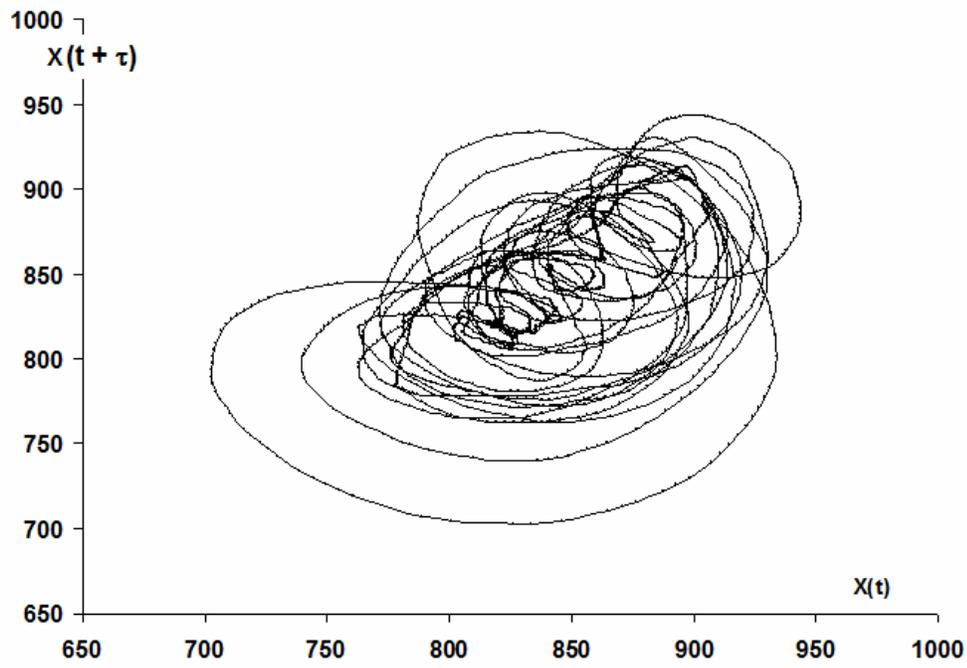


Figura 3. Espacio de fase reconstruido según (1) para el grupo de pulsaciones en 237, 327, 408 y 610 MHz.:

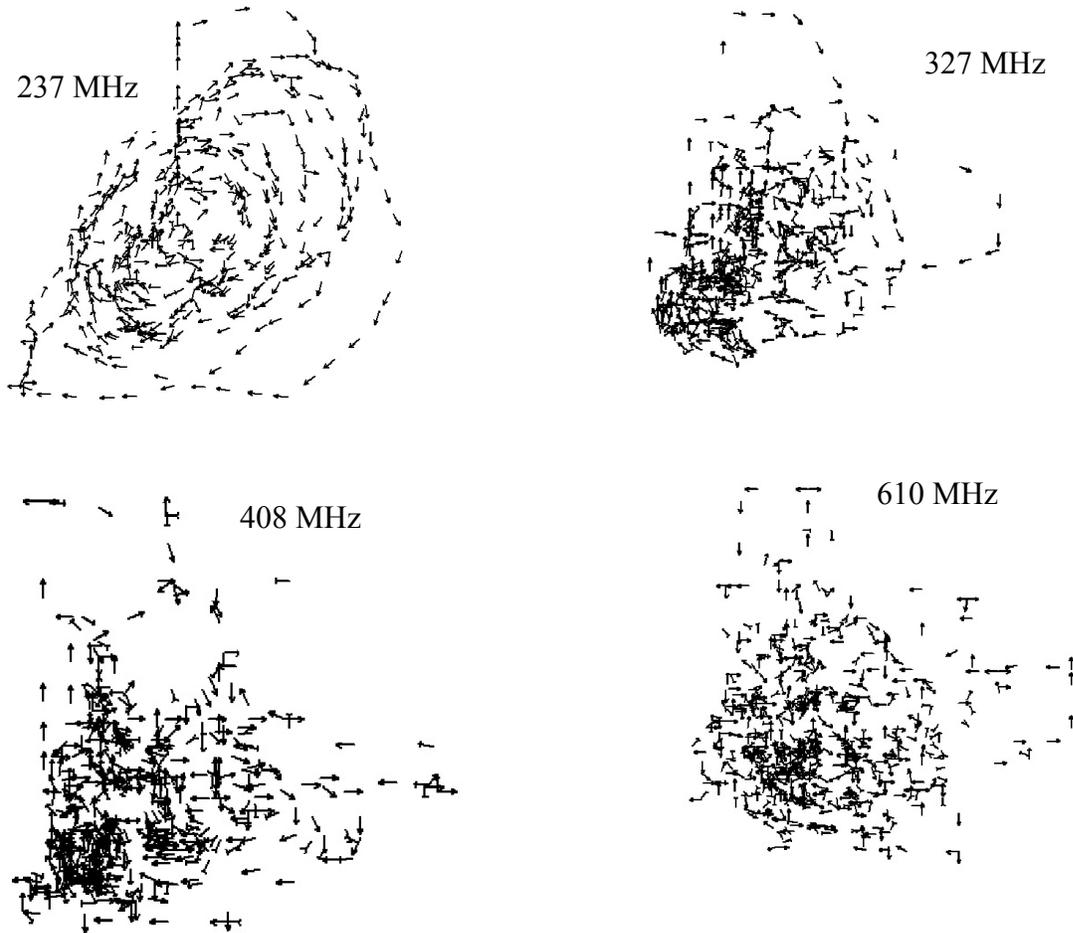
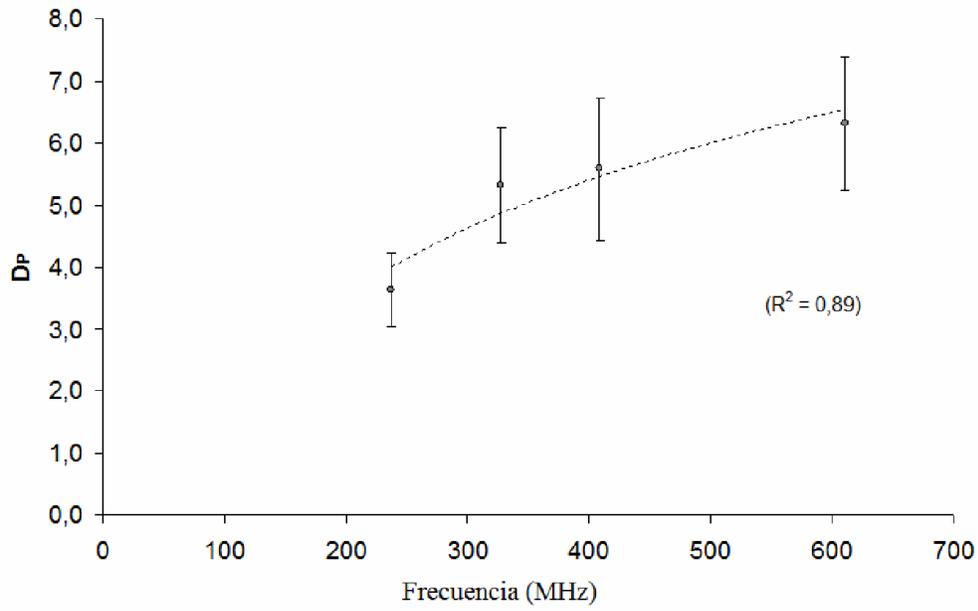


Figura 4. Variación de la dimensión del sistema con la frecuencia.



Anexos

Anexo 1: artículo “Deterministic behaviour in the dynamics of solar metric radio bursts with intermediate drifting patterns”. Publicado en *Astrophysics and Space Science* (2013).

Anexo 2: artículo “Caracterización de *fibers* a frecuencia fija en la radio emisión solar. Criterio para su selección”. Publicado en *Ciencias de la Tierra y el Espacio* (2013).

Anexo 3: artículo “Solar fiber bursts dynamic: regular, deterministic chaos or stochastic”. Aprobado para publicar en *Revista Cubana de Física* (2014).

Anexo 4: artículo “Transition from low to high dimensional chaos in a group of pulsations recorded in a broad radiowave interval”. Sometido a proceso de arbitraje, enviado a publicar a *Astrophysics and Space Science* (2014).